

Análise experimental da influência da alternância na inclinação de estribos na capacidade portante em vigas de concreto armado

Bruno Borges de Oliveira (1), Alexandre Vargas (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) brunodpa@unesc.net, (2) avargas@unesc.net

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a capacidade portante, na flexão, de vigas de concreto armado utilizando estribos com inclinações alternadas de 45° e 90° objetivando enrijecer a estrutura e redistribuir os esforços ao longo da seção longitudinal. Para tanto, foram confeccionadas 6 vigas com seção de $12 \times 30 \text{ cm}$ e comprimento de $2,10 \text{ m}$ divididas em dois grupos: O grupo A, com vigas dotadas de estribos verticais; e o grupo B composto pelas vigas com estribos alternados, mantendo o mesmo espaçamento do grupo A, ao longo do eixo longitudinal. As vigas foram ensaiadas utilizando o ensaio de flexão a quatro pontos, e como resultado, observou-se um acréscimo na capacidade portante das vigas com estribos alternados em torno de 3% e uma redução nos deslocamentos desse grupo, de aproximadamente 14%.

Palavras-chave: deslocamento; capacidade portante; estribos inclinados.

Introdução

Em vigas de concreto armado, usualmente são utilizadas armaduras transversais (estribos) com ângulo de 90° em relação ao eixo horizontal para combater os esforços de cisalhamento. A NBR 6118: 2014 admite dois modelos de cálculo (modelo I e modelo II), sendo que ambos não consideram a influência dos estribos na capacidade portante das vigas quanto aos esforços de flexão. Ainda sobre as armaduras transversais, a mesma norma, admite

(EONHARDT e MONNIG, 2008) afirmam que em vigas de maiores dimensões a inclinação dos estribos de $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ possui maior influência contra aberturas e fissuras, pois dessa forma diminuem os esforços nas bielas de compressão e o valor do deslocamento do diagrama. Segundo Duarte (2007, p. 78): Empregando o ângulo dos estribos $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, resultará em uma força cortante resistente na verificação da integridade das bielas comprimidas, maior do que quando se emprega $\alpha = 90^\circ$, chegando ao dobro da força resistente quando o ângulo utilizado for $\alpha = 45^\circ$.

Comparando experimentalmente, apenas as armaduras de vigas (antes da concretagem) utilizando estribos verticais com o conjunto de estribos inclinados e verticais alternadamente, observou-se, intuitivamente, um aumento da rigidez no segundo, especialmente quanto à deformação. De acordo com P. COLAJANNI: 2014 em pontes, cada vez mais está sendo utilizado reforço em vigas de concreto armado com estribos inclinados em ângulos alternados. Dessa forma, as cargas são distribuídas de maneira mais uniforme para os apoios diminuindo as deformações e a ocorrência de fissuras. Outras pesquisas como a de ZAMRI (2018) mostra que estribos inclinados aumentam a resistência cortante em 20,8% se comparado com estruturas armadas convencionalmente.

Nessa linha, esse trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a capacidade portante na flexão, de vigas de concreto armado utilizando inclinações alternadas de 45° e 90° na armadura de cisalhamento. Nesse estudo foi utilizado o ensaio de flexão à quatro pontos, para avaliar experimentalmente se realmente ocorre um acréscimo de capacidade portante apenas alterando o método de montagem dos estribos, resultando em um aumento de cerca de 12,81% no consumo de armadura de cisalhamento para as vigas com estribos alternados. A Figura 1, ilustra a proposta desse trabalho.

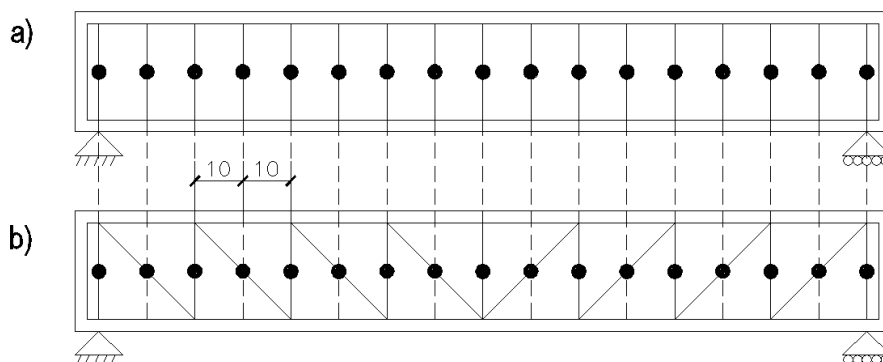


Figura 1. (a) Vigas com estribos verticais; (b) Vigas com estribos verticais e inclinados alternadamente

Materiais e métodos

Para este experimento foram fabricadas seis vigas de concreto armado, divididas em dois grupos. O Grupo A é composto por três vigas de seção transversal constante de 12x30 cm e comprimentos de 210cm. Todas as vigas desse grupo foram montadas com estribos verticais. O Grupo B, também formado por três vigas com as mesmas seções e comprimentos utilizados no Grupo A, porém montadas com estribos verticais e inclinados à 45° de forma alternada.

Todas as vigas foram ensaiadas a flexão no LEE – Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC utilizando ensaio de flexão à 4 pontos. O concreto foi ensaiado a compressão simples no LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil, também as UNESC, seguindo a norma NBR 5739-2007. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura das vigas utilizadas.

Tabela 1: Nomenclatura das vigas utilizadas no experimento.

Simbologia	Tipo
VC1	Vigas com armadura convencional.
VC2	
VC3	
VX1	Vigas com estribos inclinados.
VX2	
VX3	

As armaduras utilizadas nas 6 vigas experimentais foram disponibilizadas pela empresa Arcelor Mittal de Içara – SC, sendo confeccionadas com estribos de aço CA-60 Ø5.0 mm a cada 12,5 cm. Dessa forma, os estribos atendem a taxa de armadura mínima e o espaçamento máximo referente a $0,6d$ (60% da altura útil da viga) fazendo com que o arranjo alternado dos estribos à 45° e 90°, formem nós semirrígidos como aos de uma treliça. Na face superior da viga foram utilizadas duas barras como porta estribos de aço CA-60 Ø5.0 mm. Em todas as vigas foram adotadas a mesma armadura de flexão: 2 barras de aço CA-50 Ø10.0 mm. O cobrimento do aço é de 2,5 cm, conforme o recomendado pela NBR 6118:2014 correspondente a classe de agressividade ambiental I. Foi utilizado concreto do tipo usinado C25 disponibilizado pela concreteira Metalenge localizada no município de Turvo-SC. A Figura 2 mostra o detalhamento das armaduras utilizadas.

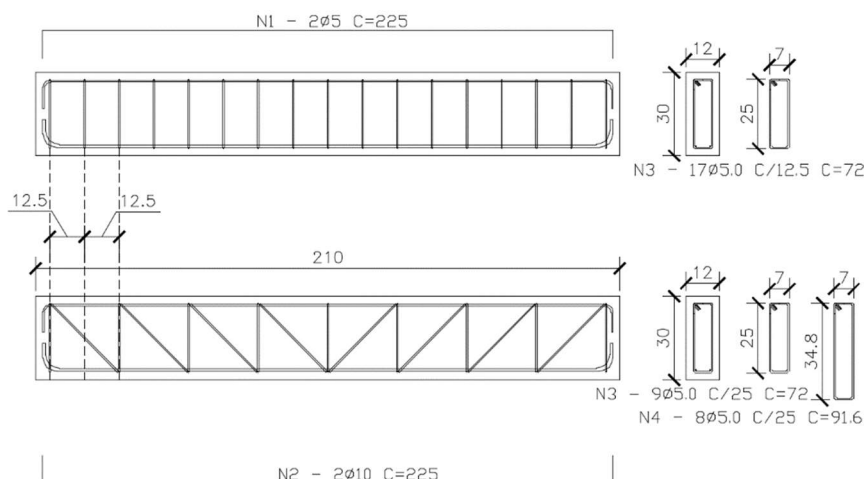


Figura 2: Detalhe da armadura utilizada

Conhecidas as armaduras, e utilizando as equações clássicas para dimensionamento de concreto armado, foi possível determinar os esforços resistentes das vigas (sem os coeficientes de majoração). Os valores encontrados no dimensionamento para o estágio III de deformação foram: 19,94 kN.m para o momento fletor (MK); 30,14 kN para o esforço cortante (Vsk) e considerando o peso próprio da estrutura estimou-se a capacidade de carga de 58,48 kN para ambos os grupos.

Na moldagem das vigas, foram utilizadas formas de madeira, com uma demão de desmoldante, facilitando a desforma, conforme item 7.2.7 da NBR 14931:2004. A Figura 3 ilustra a fabricação das formas e armaduras.

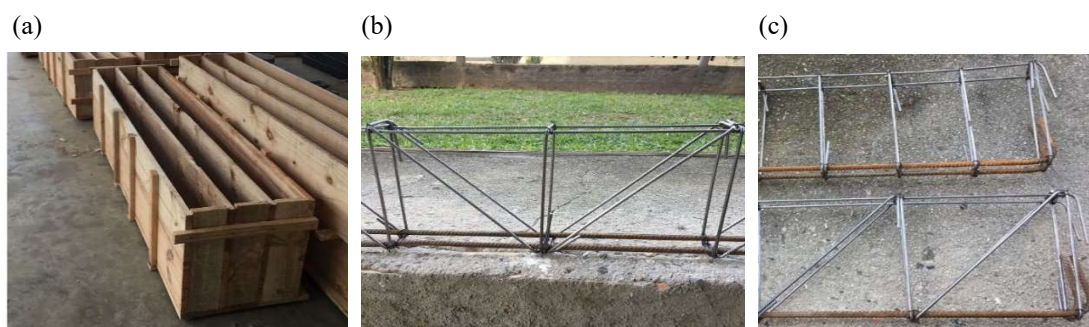


Figura 3: (a) Formas de pinus; (b) Armadura no centro da viga; (c) Armadura com o mesmo alinhamento.

O concreto utilizado para a fabricação das vigas foi do tipo C25 usinado com abatimento de 10 +/- 2 mm. Ocorreu o controle de resistência através de 9 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm, confeccionados, no decorrer da concretagem, conforme a norma de procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova NBR 5738:2015. A Figura 4 ilustra: o ensaio de consistência do concreto, a moldagem das vigas e os corpos de prova moldados.

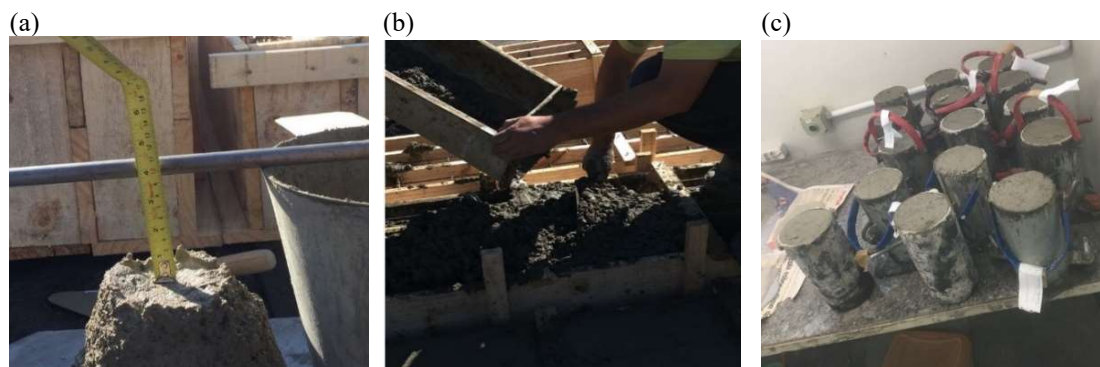


Figura 4: a) Ensaio de abatimento; b) Concretagem das vigas; c) Corpos-de-prova

Os corpos de prova permaneceram submersos no período de 28 dias. Após esse período de cura, foram realizados os ensaios de compressão simples dos corpos de prova no LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil conforme a norma para ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos NBR 5739:2007.

As vigas permaneceram cobertas por uma lona plástica durante sete dias, sendo descobertas apenas uma vez ao dia para hidratação. Quanto à desforma das vigas, foram realizadas somente uma semana antes dos ensaios. Na Figura 5, são mostradas as etapas de cura e desforma.



Figura 5: (a) Vigas recém concretadas; (b) Cura; (c) Vigas desformadas

Para avaliação da capacidade portante das vigas foram realizados os ensaios de flexão à quatro pontos no LEE – Laboratório Experimental de Estruturas localizado no IParque da UNESC seguindo o preconizado pela NBR 12142:2010. Esse ensaio consiste em colocar um apoio em cada extremidade da viga, sendo um de primeiro gênero (rolete) e outro de segundo gênero (apoio fixo). Dessa forma o vão efetivo da viga foi de 2,00m. Na face superior da viga foram instalados dois roletes metálicos afastados 66,7cm do centro de cada apoio (1/3 do vão efetivo). Sobre os roletes foi colocada uma viga metálica enrijecida pra transmitir a carga aplicada. Os roletes e a estrutura metálica foram considerados nos cálculos, representando uma carga de 0,3394 kN. No centro da viga foram instalados os LVDTs para determinar os deslocamentos durante o ensaio e para leitura foi utilizado o sistema de aquisição de dados Quantum X® que utiliza o software Catman Easy®, ambos da marca HBM®. A Figura 6 apresenta o esquema do ensaio.

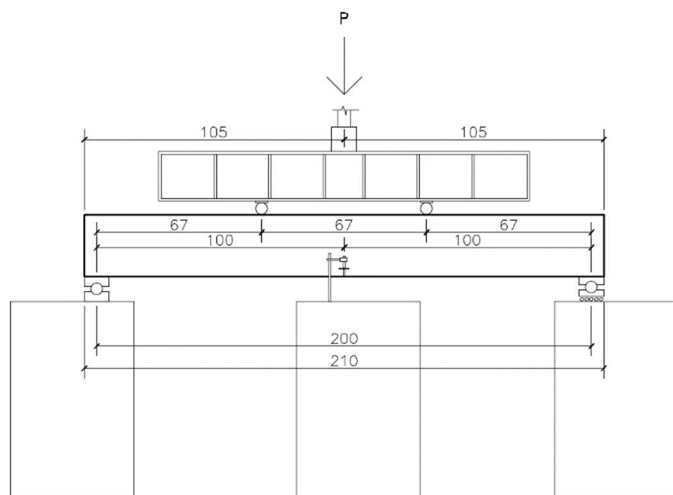


Figura 6: Esquema do ensaio de flexão à quatro pontos

Resultados e discussões

Vinte e oito dias após a moldagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de compressão simples e módulo de elasticidade no LMCC. Os ensaios realizados seguiram as normas NBR 5739:2007 para ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico e a NBR 8522:2014 para determinação de módulo estático de elasticidade à compressão. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Ensaio de compressão e modulo de elasticidade.

Amostra	Resistência a compressão axial (MPa) - 28dias	Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa) - 28 dias
CP1	42,46	CP1	41,03
CP2	45,03	CP2	38,95
CP3	43,56	CP3	43,25
CP4	44,44		
CP5	43,08		
CP6	42,78		
média	43,56	média	41,08
Desv. Padrão	0,9964	Desv. Padrão	2,1500

O valor médio de resistência a compressão axial ficou em 43,56 MPa sendo superior ao valor estimado inicialmente de 25 MPa. O valor obtido para o módulo de elasticidade ficou em conformidade com o valor obtido pelo ensaio de compressão axial, atendendo o especificado na NBR 6118:2014. Recalculando os valores de V_{sk} e M_k de cálculo para o f_{ck} encontrado,

chegou-se aos seguintes resultados: 30,94 kN para os esforço cortante, 20,48 kN.m para o momento fletor e capacidade de carga de 60,08 kN para que a viga alcance seu estado limite de deformação ($L/250$).

Após os ensaios de controle de qualidade do concreto, foram realizados os ensaios de flexão a quatro pontos no LEE. Nessa etapa foram analisadas a relação carga x deslocamento, a flecha máxima de serviço ($L/250$) e a carga de ruptura. A Figura 7 mostra os ensaios realizados.



Figura 7: Ensaio de flexão a 4 pontos

A Tabela 3 apresenta as cargas aplicadas para atingir o deslocamento máximo de serviço. Segundo o item 13.3 da norma NBR 6118:2014 o deslocamento máximo visível em elementos estruturais é de $L/250$. Aplicando esse conceito no ensaio a deformação limite de serviço é de 8mm para o vão efetivo de 2,00m.

Tabela 3: Carga aplicada no deslocamento limite de serviço ($L/250$).

Aplicação de carga + suporte metálico		
Amostra	VC (kN)	VX (kN)
1	61,98	64,07
2	63,26	64,86
3	62,63	64,58
Média	62,62	64,50
Des. Padrão	0,64	0,40

Ao analisar os resultados observa-se que houve uma variação da ordem de 3,0%, comparando as vigas convencionais com as vigas treliçadas. Outra observação realizada foi a

comparação entre os valores médios obtidos nos ensaios e a capacidade de carga estimada, chegou a uma variação de 4,1% para as vigas VC e 6,9% para as vigas VX. Os resultados dos experimentos foram bem próximos do previsto considerando que não foram realizados ensaios para determinar a real resistência do aço.

A Tabela 4 mostra os carregamentos e as flechas máximas atingidas no instante da ruptura.

Tabela 4: Carregamento e deslocamento máximos na ruptura.

Aplicação de carga + suporte metálico				
Amostra	VC (kN)	Deslocamento (mm)	VX (kN)	deslocamento (mm)
1	75,50	37,06	75,85	30,40
2	81,62	61,21	78,85	31,25
3	76,57	60,29	76,13	30,12
Média	77,90	52,85	76,94	30,59
Des. Padrão	3,270	13,682	1,655	0,588

Na ruptura percebe-se uma perda de resistência, nas vigas com estribos alternados, de aproximadamente 1,23% ao comparar a média das máximas cargas aplicadas. Quanto ao deslocamento na ruptura, observa-se que as vigas VC2 e VC3 obtiveram um deslocamento médio maior em torno de 98,6% em relação a média das vigas VXs.

Para fazer uma relação entre os deslocamentos, foi utilizado como referência o carregamento médio das vigas convencionais, 62,62kN, para uma deformação de 8mm correspondendo L/250. Nessa verificação observou-se uma redução no deslocamento em torno de 13,47% nas vigas VX, com estribos alternados, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Relação entre carregamento e deslocamento vertical.

Amostra	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	
		VC	VX
1	61,98	8,5	7,3
2	63,26	7,7	6,9
3	62,63	8,0	6,8
Média	62,62	8,09	7,00

O comportamento das vigas experimentais pode ser observado na Figura 8 que mostra o deslocamento vertical em relação a carga aplicada.

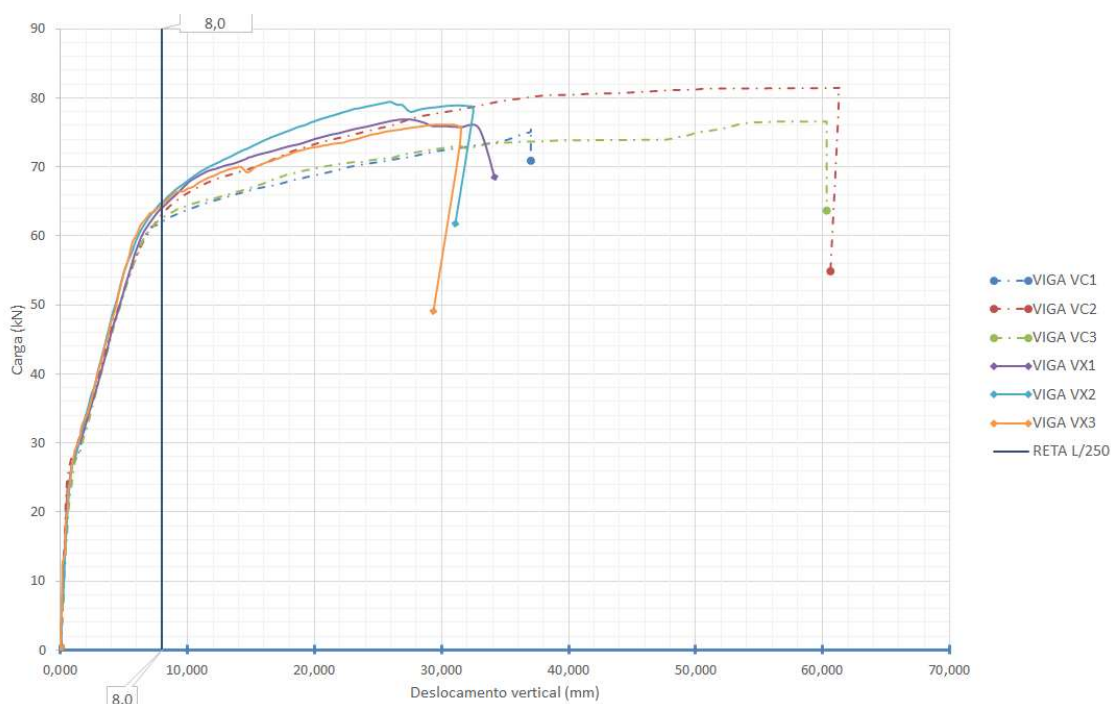


Figura 8: Curva Carga x deslocamento vertical

Com os resultados obtidos nos ensaios também podemos fazer uma comparação entre os valores máximos alcançados em cada experimento. A Figura 9 faz uma comparação entre as cargas aplicadas nas vigas no momento da flecha máxima e da ruptura.

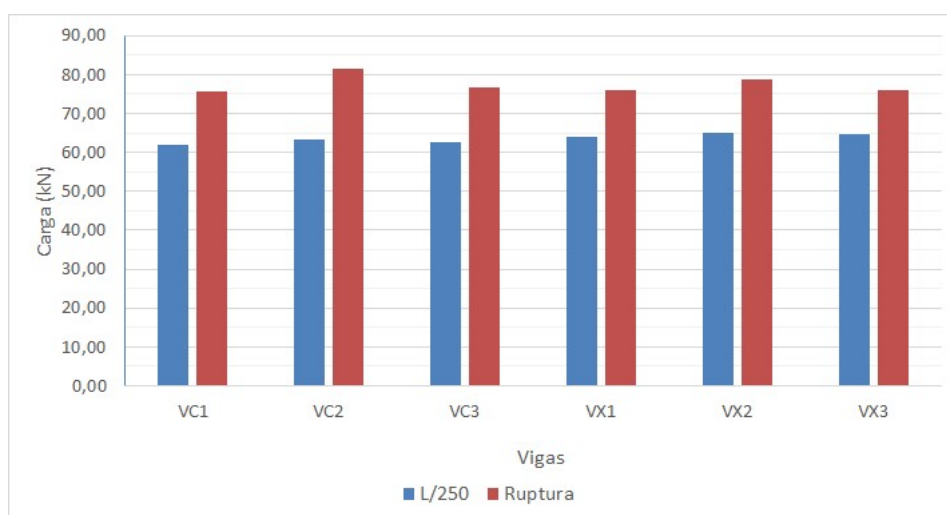


Figura 9: Comparação entre as cargas aplicadas nas vigas

Análise estatística dos resultados

Para analisar a significância dos resultados obtidos nos ensaios utilizou-se o método estatístico de análise de variância ANOVA com nível de confiabilidade de 95% ($\alpha=0,05$), conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Resultados estatísticos

	F		F _{crítico}	Valor de - P	
Carga no instante da flecha limite	18,52	>	7,71	0,01261	v
Cargas no instante da Ruptura	0,20	<	7,71	0,67539	x
Flecha para carga de 62,62 kN	13,54	>	7,71	0,02119	v

Embora o acréscimo de carga na flecha limite tenha sido de somente 3,0%, essa diferença mostrou ser significativa estatisticamente. Ao compararmos o deslocamento para uma carga de 62,62 kN também se mostrou significativo com uma variação de 13,6%. Já na carga de ruptura não houve significância na variação dos resultados.

Para uma melhor interpretação dos resultados, utilizou-se o teste de Tukey para verificar quais experimentos tiveram variações. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos pelo teste de Tukey.

Tabela 7: Teste de Tukey

Grupo	carregamento em (L/250) (kN)	Carregamento na Ruptura (kN)	deslocamento (mm) para 62,62 kN
VR	62,62 a	77,90 a	8,09 a
VX	64,50 b	76,94 a	7,00 b

Nessa tabela as médias que apresentaram a mesma letra nas colunas não apresentaram diferença significativa estatisticamente de acordo com o Teste de Tukey. Dessa forma, comprova-se com um nível de 95% de certeza que os valores dos carregamentos na flecha máxima e o deslocamento para uma carga de 62,62 kN apresentam variações significativas.

Conclusão

Para o ensaio de flexão a quatro pontos houve diferença estatisticamente significativa ao analisar a capacidade de carga no estado limite de serviço, com acréscimo na ordem de 3,0%, nas vigas com estribos alternados.

Ao aumentar a rigidez da armadura apenas mudando a inclinação dos estribos obteve-se uma redução de 13,6% no deslocamento máximo das vigas com estribos alternados, para a mesma carga aplicada, de 62,62 kN, nas vigas convencionais.

Já as cargas na ruptura não mostraram variações estatisticamente relevantes para ambos os experimentos. Porém as vigas VX obtiveram redução de 98,6% nos deslocamentos para o estado de ruptura ao serem correlacionadas com as vigas VC2 e VC3.

Sendo assim, comprova-se que houve aumento de rigidez da estrutura, ocasionando a perda da ductilidade da mesma. Dessa forma houve uma perda significativa na margem de segurança entre o deslocamento para o estado limite de serviço e a ruptura. Portanto os resultados obtidos não foram satisfatórios, sendo que, houve aumento de resistência apenas no estado limite de serviço, e ao realizar uma perícia técnica a viga com estribos alternados estaria muito mais próxima da ruptura ao ser comparada com uma viga convencional.

Sugestão para trabalhos futuros

Realizar o mesmo estudo com diferentes seções e comprimentos, para verificar se há linearidade dos resultados obtidos.

Refazer o experimento comparando a resistência ao cisalhamento de vigas com todos estribos inclinados a um ângulo $\alpha = 45^\circ$ e vigas com estribos alternados.

Repetir o estudo, porém analisando apenas o cisalhamento com a carga aplicada a um ângulo $\alpha = 45^\circ$ à partir do centro de um dos apoios.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-deprova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Calculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4ª ed. São Carlos: Edufscar, 2016. 415 p.

COLAJANNI, Piero. Shear capacity in concrete beams reinforced by stirrups with two different inclination. **Elsevier**, Itália, dez. 2014. Seção Engineering Structures. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614006166>>. Acesso em: 26 mar. 2018

DUARTE, Douglas de Souza. Estudo comparativo entre os dois métodos propostos pela NBR 6118:2007 para o dimensionamento da armadura de cisalhamento em vigas sujeitas a flexão simples. **Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 15, p.74-87, 2009.

ZAMRI, Nor Fazlin; MOHAMED, Roslli Noor. The Effects of Inclined Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beam. **Malaysian Journal Of Civil Engineering**, Malásia, v. 30, n. 1, p.86-96, abr. 2018. Mensal. Disponível em: <<https://mjce.utm.my/index.php/MJCE/article/view/169>>. Acesso em: 01 set. 2018.

LEONHARDT, Fritz; MONNIG, Eduard. Construções de concreto. Editora Interciência, 1982 V1.